

DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.4
УДК 621.37

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОЗАМЕТНЫХ ЦЕЛЕЙ НА БАЗЕ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

И. В. Погорельский, А. В. Луканов, В. К. Цветков, К. С. Лялин

Национальный Исследовательский Университет «МИЭТ»,
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1

Статья поступила в редакцию 2 марта 2020 г.

Аннотация. В связи с развитием летательных аппаратов и средств радиоэлектронной борьбы, вопрос появления отечественной радиолокационного комплекса (РЛК) на базе ЦАР является крайне важным. На данный момент её разработка ведётся коллективом института МПСУ НИУ МИЭТ. При её разработке были реализованы различные нестандартные технологические решения, например, такие как использование круговой концентрической антенной решётки. В данной работе рассматриваются как общая структура предлагаемого РЛК, так и конкретные его блоки: модулятор АФАР, блок формирования опорных сигналов (БФОС), блок деления сигнала гетеродина (БДСГ). Основные результаты работы докладывались на XIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь».

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, ЦАР, многоканальная РЛС, АФАР, БПЛА.

Abstract. Aerial vehicles and methods of radio electronic warfare quickly improve, therefore, development of radar system based on the digital antenna array is a very important problem nowadays. Currently such radar system is being developed by engineers' group of MDCS Institute of National Research University of Electronic Technology. Several technical solutions were implemented during the development, such as the use of a circle concentric antenna array. General structure of developed radar system is described in detail in this work. Also its specific blocks, such as an

active phased antenna array modulator, reference signal forming unit and local oscillator signal distribution unit are discussed briefly. Use of classic antenna array is coupled with certain problems in the cases of wide sector of radiation and thin scanning ray forming. In this radar system the solution of the most crucial problems is the circle concentric placement of transmitters on the receiving digital antenna array. Optimal structure for this radar system is a hybrid one that provides required characteristics for detecting subtle targets. In this case transmitting part is represented by active phased antenna array that forms relatively wide highlighting beam whereas receiving part is represented by digital antenna array that provides several thin scanning beams.

Key words: digital antenna array, DAA, multichannel radar, АРАА, UAV.

Введение

Цифровые антенные решётки (ЦАР) являются следующим шагом в развитии радиолокационных средств. Они представляют собой антенную решётку, форма диаграммы направленности которой определяется цифровыми управляющими командами – весовыми коэффициентами в каждом канале. Подобная настройка позволяет эффективнее бороться с помехами и значительно повышает вероятность обнаружения целей с малыми эффективными площадями рассеивания (ЭПР), например, как у современных летательных аппаратов, в особенности беспилотных.

В связи с развитием летательных аппаратов и средств радиоэлектронной борьбы, вопрос появления отечественной радиолокационного комплекса (РЛК) на базе ЦАР является крайне актуальным. На данный момент разработка подобного РЛК ведётся коллективом института МПСУ Национального Исследовательского Университета МИЭТ. В ходе разработки были реализованы такие технические решения, как использование круговой концентрической антенной решётки. В данной работе рассматриваются как общая структура разрабатываемого РЛК, так и конкретные его блоки: модулятор АФАР, блок формирования опорных сигналов (БФОС), блок деления сигнала гетеродина (БДСГ).

Целью данной работы является архитектура разрабатываемого РЛК и требования к характеристикам его отдельных элементов. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи: проведён системный расчёт РЛК, моделирование элементов, макетирование блоков, разработка и моделирование антенного полотна.

1. Описание РЛК

Использование классической антенной решетки в случае широкого сектора обзора и при формировании узкого сканирующего луча сопряжено с определёнными проблемами. Применение антенной решётки с межэлементным расстоянием, равным половине длины волны в области высоких частот, становится затруднительным, поскольку межэлементное расстояние становится сопоставимым или меньше размера канала. Однако формирование узкого сканирующего луча требует большого количества излучателей, что приводит к увеличению габаритов антенного полотна. Таким образом, при фиксированных габаритах не всегда возможно реализовать антенную решётку с требуемыми параметрами. Решением проблемы в данном РЛК является круговое концентрическое расположение излучателей на антенной решётке, изображённое на рисунке 1а.

Тем не менее АФАР как с классическим, так и с концентрическим кольцевым расположением элементов формирует один луч, которым осуществляется сканирование в заданном секторе. Так как сканирующий луч значительно меньше облучаемого сектора, то обзор в облучаемом секторе производится последовательно, что влияет на время обработки радиолокационной информации. Использование приёмной ЦАР позволяет сформировать несколько сканирующих лучей, полностью покрывающих облучаемый сектор, как это показано на рисунке 2б. Это позволяет перейти от последовательного обзора пространства к параллельному, что обеспечивает большую скорость обработки информации.

Оптимальной структурой РЛК, обеспечивающей необходимые характеристики для обнаружения малозаметных целей является гибридная

структура. В таком случае передающая часть представлена в виде АФАР, формирующей относительно широкий луч, а приёмная в виде ЦАР, реализующей несколько узких лучей. При такой конфигурации для исключения взаимного влияния передающей и приёмной части возможна реализация разнесённого РЛК с опциональным экранированием передающей АФАР.

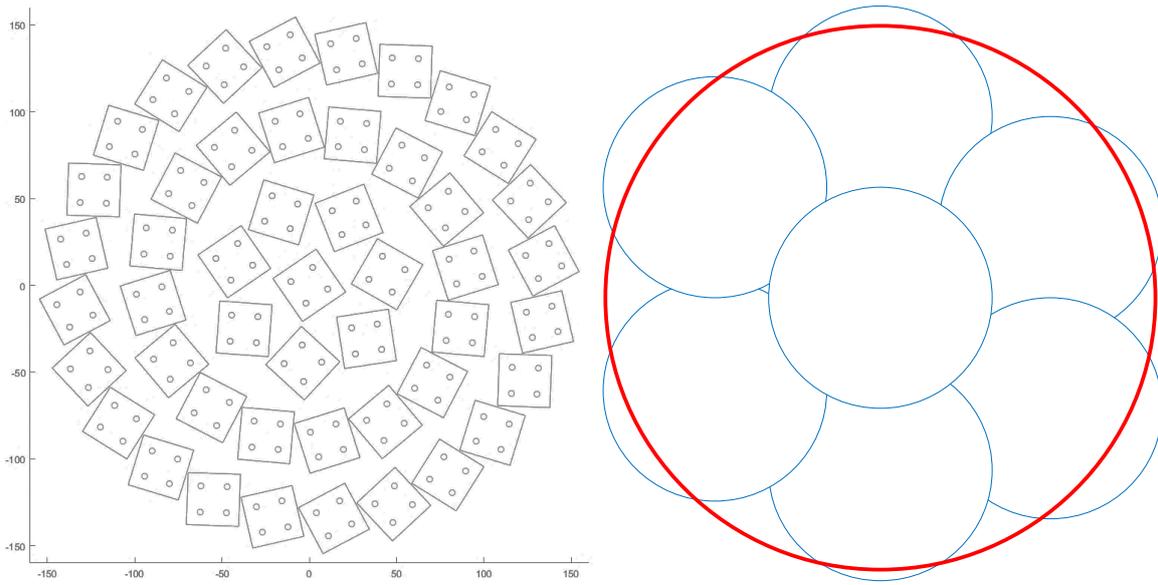


Рис. 1. Круговое концентрическое расположение элементов антенной решётки (а – слева) и покрытие облучаемого сектора (большая окружность) сканирующими лучами (малые окружности) (б – справа)

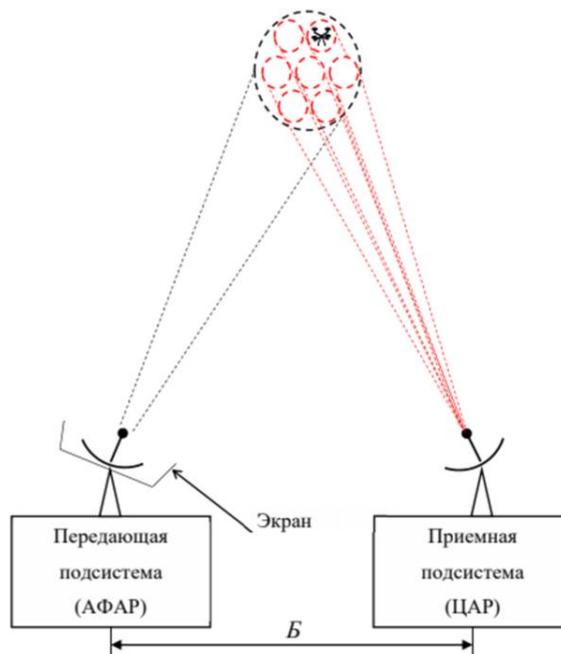


Рис. 2. Схема РЛК, объясняющая принцип работы.

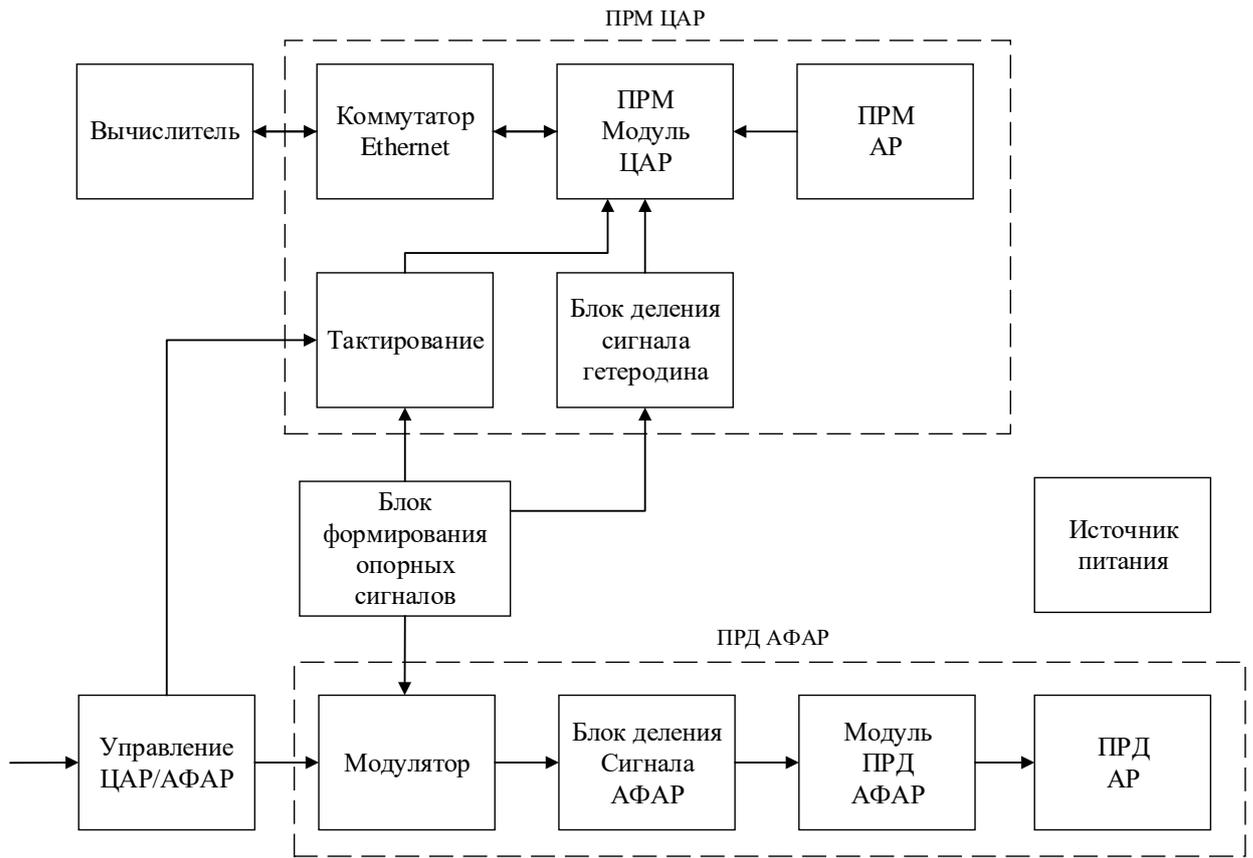


Рис.3. Структурная схема предлагаемой архитектуры.

Для данного РЛК разработана структурная схема, изображённая на рисунке 3. Принятый описанной выше антенной решеткой сигнал поступает в один из 40 приемных модулей ЦАР, на каждом из которых расположено 4 приемных канала, усиливающих, фильтрующих и демодулирующих сигнал. Сигнал с каждого приемного канала оцифровывается, передается в блок цифровой обработки сигналов приемного модуля и по Ethernet-кабелю передается в маршрутизатор, объединяющий информацию с 40 приемных модулей, таким образом оптимизируется процесс передачи большого потока данных. Демодуляция принятого сигнала обеспечивается единым синфазным сигналом, поступающим с блока формирования опорных сигналов через блок деления сигнала гетеродина. Трехмерное изображение приемной ЦАР представлено на рисунке 4.

Передающая АФАР представляет собой 64-элементную эквидистантную передающую антенную решетку, в каждом канале которой производится

усиление и задается требуемое смещение фаз для формирования диаграммы направленности.

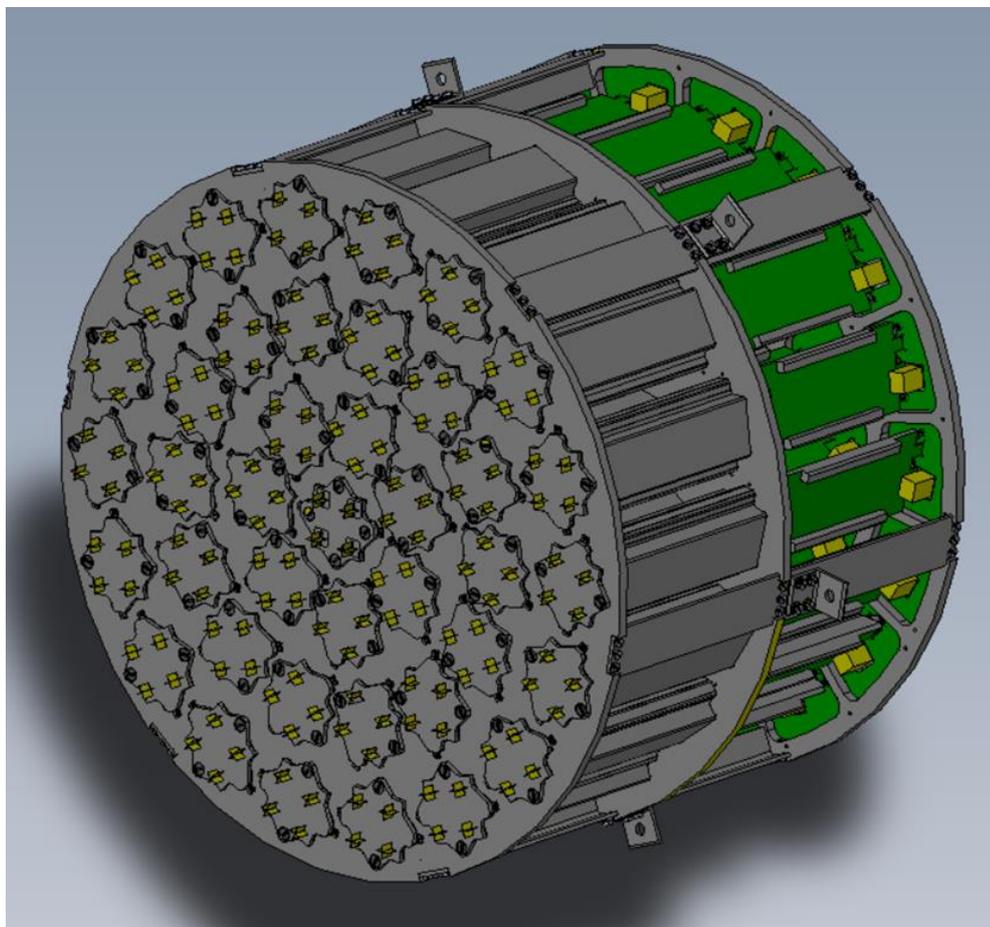


Рис.4. Компоновка элементов приемного модуля ЦАР со 160 каналами.

На данный момент изготовлены следующие блоки: блок формирования опорного сигнала, блок деления сигнала гетеродина и блок модулятора для передающей АФАР. Перейдём к их рассмотрению.

2. Блок формирования опорных сигналов

Блок формирования опорных сигналов предназначен для генерирования сигналов двух типов: прямоугольного сигнала, применяемого при тактировании работы приёмного модуля ЦАР, а также опорного высокочастотного сигнала, применяемого как в передающей АФАР, так и в приёмной ЦАР. Внешний вид блока показан на рисунке 5:

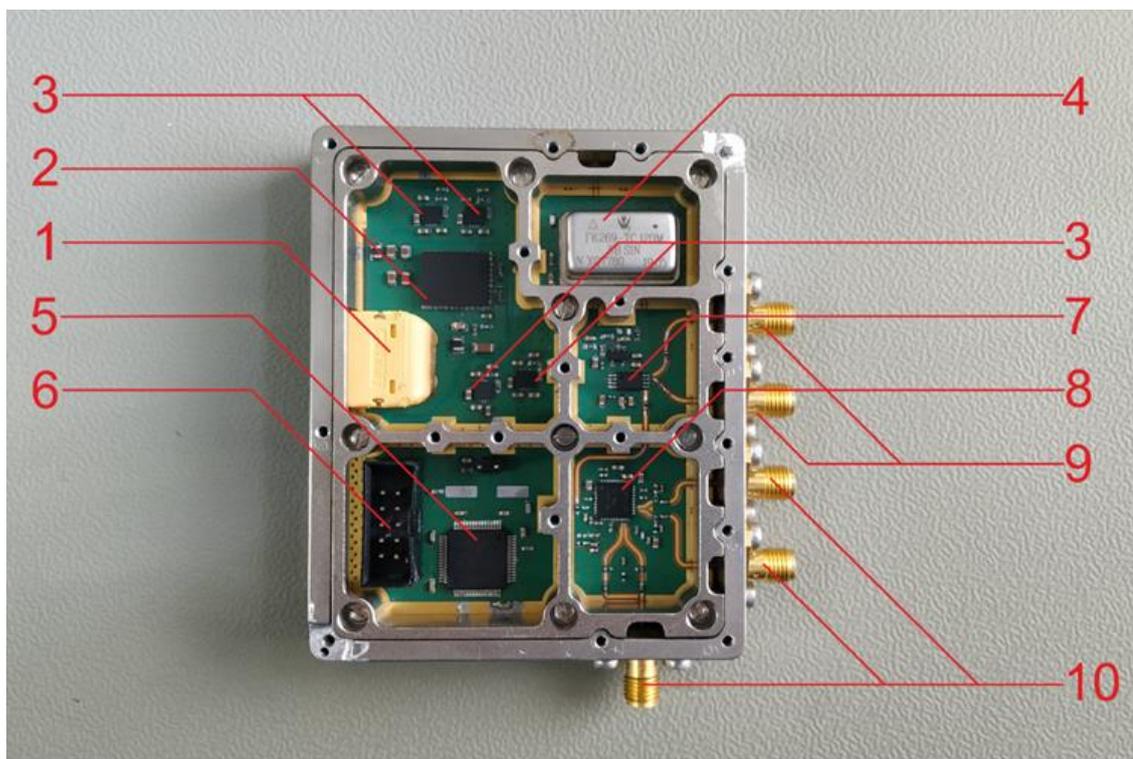


Рис.5. Внешний вид блока в корпусе без крышки. Цифрами обозначены: 1 – разъём питания XT-60; 2 – импульсный стабилизатор питания TPS84250; 3 – линейные стабилизаторы ADM7151; 4 – термостабильный кварцевый генератор ГК-269; 5 – контроллер STM32F103RDT; 6 – разъём IDC-10M; 7 – дистрибьютор тактирующего сигнала CDCLVC1104PW; 8 – синтезатор частот LMX2594; 9 – выходной SMA-разъём тактирующего сигнала; 10 – выходной SMA-разъём высокочастотного сигнала.

Блок рассчитан на работу от +12 В, но может выдерживать скачки напряжения до +50 В. При подаче питания на выходе кварцевого генератора появляется синусоидальный сигнал, который через КМОП буфер подаётся на дистрибьютор тактирующего сигнала. Два выхода дистрибьютора соединены с разъёмами, и их выходной сигнал передаётся на блок тактирования ЦАР. Третий выход дистрибьютора соединён со входом опорного сигнала синтезатора частот. Благодаря высокой стабильности кварцевого генератора, этот тактирующий может использоваться в качестве эталонного при формировании высокочастотного сигнала. Параллельно с описанным процессом включается контроллер, вызывает из памяти программу и отправляет её по SPI-интерфейсу на синтезатор частот. После получения

эталонного сигнала и управляющей программы, на выходах синтезатора появляется требуемый высокочастотный сигнал.

Поскольку данный блок используется для тактирования работы приёмного модуля ЦАР, для сигналов, получаемых на выходе дистрибьютора ставятся ограничения по добавочному джиттеру. Поскольку нелинейные устройства, через которые проходит тактирующий сигнал, неминуемо внесут собственный добавочный джиттер, необходимо, чтобы на выходе БФОС значение суммарного джиттера не превышало 420 фс. Также предъявляются требования к уровню фазовых шумов выходного высокочастотного сигнала, связанные с ограничением чувствительности используемого в ЦАР приёмника. Уровень фазовых шумов не должен превышать минус 100 дБн.

После включения блока и отладки управляющего программного обеспечения были проведены измерения параметров выходных сигналов. Было обнаружено, что среднее значение джиттера тактирующего сигнала равно 120 фс, а уровень фазовых шумов не превышает -105 дВс.

3. Блок деления сигнала гетеродина

В состав РЛК входит 160 приемных каналов. В каждом канале частота с помощью опорного сигнала переносится на низкую частоту для дальнейшей обработки. Установка гетеродина в каждый приемный канал нецелесообразна по нескольким причинам. Во-первых, гетеродины, работающие на требуемых частотах, стоят намного дороже, чем блок распределения сигнала. Во-вторых, гетеродины сильно нагреваются во время работы, следовательно, им необходимо обеспечивать дополнительное охлаждение и теплоотвод, что сильно увеличивает габариты приемных каналов и приемного модуля в целом. Таким образом, вместо того, чтобы устанавливать гетеродин в каждый приемный канал, было принято решение разработать схему активного деления сигнала гетеродина, которая будет распределять и усиливать сигнал, полученный от БФОС на 40 приемных модулей, в каждом из которых по 4 приемных канала. БДСГ поделен на несколько модулей (БДСГ 1-16 и БДСГ 4-

16), соединяющихся между собой коаксиальными кабелями. Схема соединения модулей представлена на рисунке 6. Внешний вид блока показан на рисунке 7.

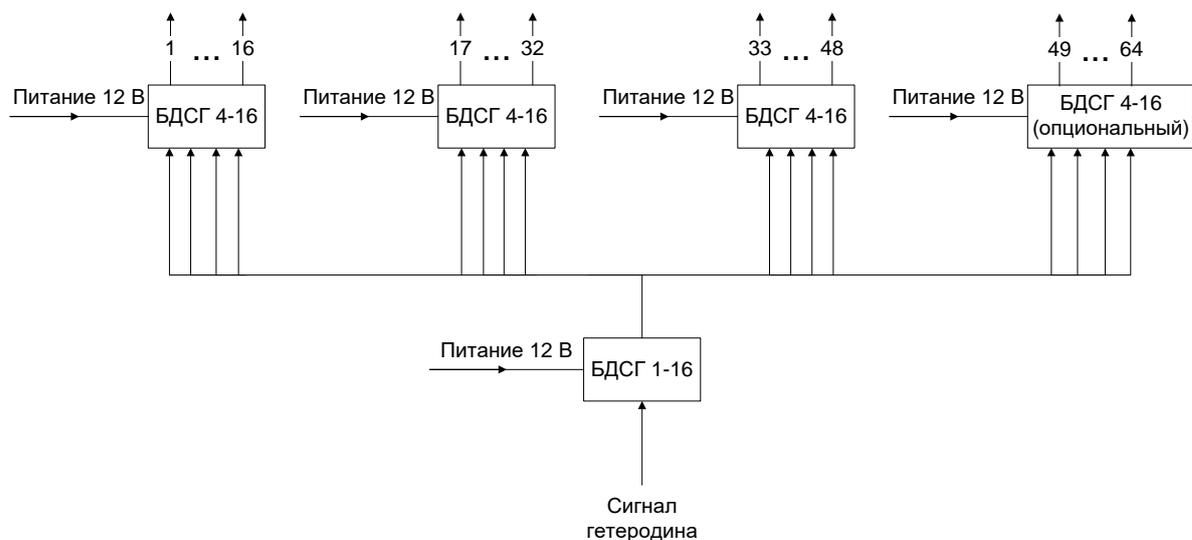


Рис.6. Схема соединения модулей БДСГ 1-16 и БДСГ 4-16.

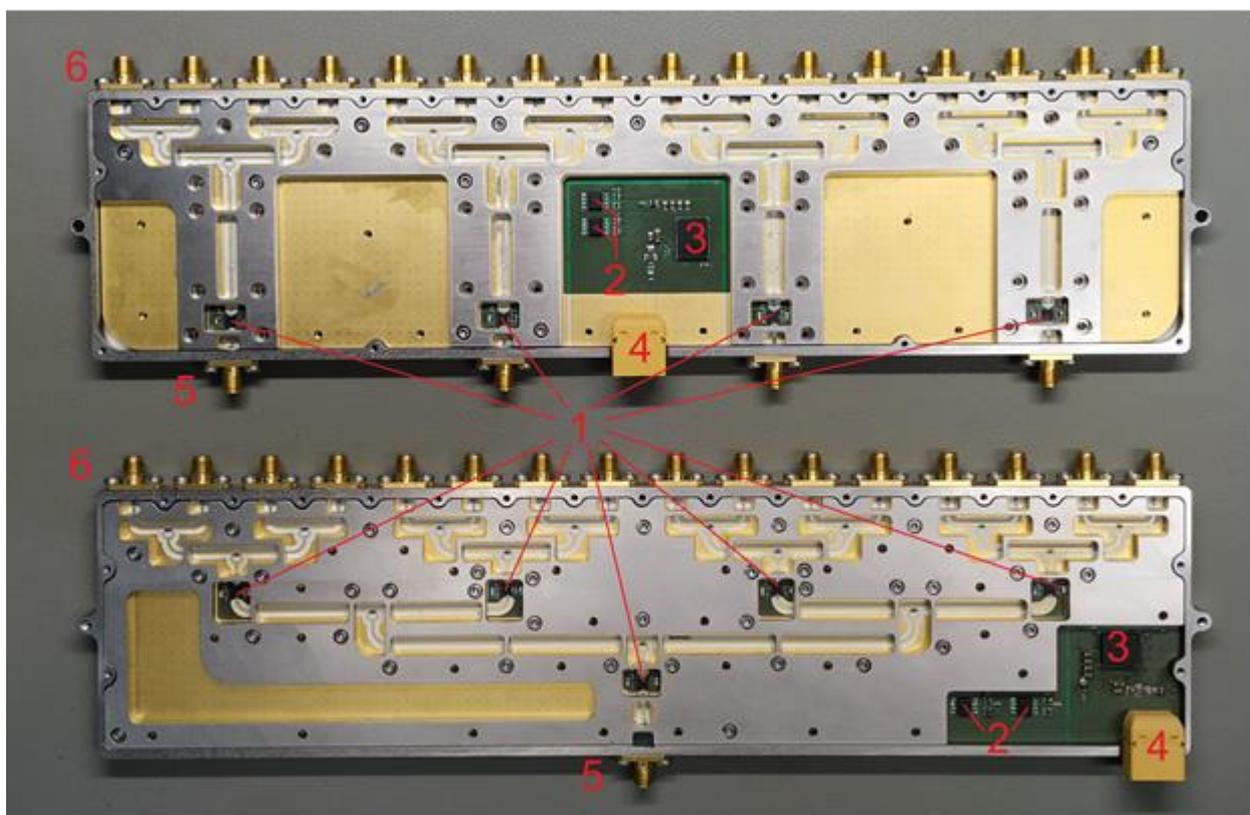


Рис. 7. Внешний вид модулей блока в корпусе без крышки. БДСГ 1-16 снизу, БДСГ 4-16 сверху. Цифрами обозначены: 1 – усилители мощности TSS-183A+; 2 – линейные стабилизаторы напряжения MIC-39102; 3 – импульсные стабилизаторы питания TPS84250; 4 – разъемы питания XT-60; 5 – входные SMA-разъемы; 6 – выходные SMA-разъемы;

Блок рассчитан на работу от +12 В, но может выдерживать скачки напряжения до +50 В. На входной разъем БДСГ 1-16 подается сигнал с БФОС мощностью -3 дБм. Сигнал усиливается и распределяется на 16 выходных разъемов. Сигнал передается на 3 модуля БДСГ 4-16 по коаксиальным кабелям, где вновь усиливается и распределяется на 48 выходных каналов. От модулей БДСГ 4-16 сигнал поступает к 40 приемным модулям ЦАР с мощностью +7 дБм. К неиспользуемым выходным каналам присоединяются согласованные нагрузки для исключения влияния отраженного сигнала на соседние выходные каналы. К обоим модулям представляются требования по КСВН по выходу (не более 2), по коэффициенту передачи (+8 дБ для БДСГ 1-16 и +4 дБ для БДСГ 4-16) и по добавочному джиттеру, вносимому всем блоком (не более 200 фс).

Модуль БДСГ 1-16 был включен и отлажен. КСВН по входу и выходу не превышает 2, а коэффициент передачи в полосе рабочих частот больше +8 дБ. БДСГ 4-16 также включен и отлажен. КСВН по входу и выходу не превышает значения 1,5, а коэффициент передачи больше +3,95 дБ. Общий добавочный джиттер всего блока не превышает 10 фс.

4. Блок модулятора АФАР

Блок модулятора предназначен для переноса в область высоких частот полезного сигнала. На входы этого блока поступает высокочастотный сигнал от БФОС и информационный от блока управления ЦАР/АФАР. Внешний вид блока показан на рисунке 8.

Блок рассчитан на работу от +12 В, но может выдерживать скачки напряжения до +50 В. На вход со стороны БФОС допускается подача опорного сигнала мощностью в диапазоне от минус 3 дБм до 5 дБм. Особенностью исполнения данного блока является возможность обработки различных типов сигнала. Применение смесителя частот RFUV1003 подразумевает использование квадратурного низкочастотного информационного сигнала. Для обеспечения и работоспособности микросхемы, и универсальности блока была разработана входная схема для приведения входных сигналов к квадратурному

представлению, позволяющая реализовать шесть различных способов подачи информационного сигнала. Эскиз данной схемы изображён на рисунке 9.

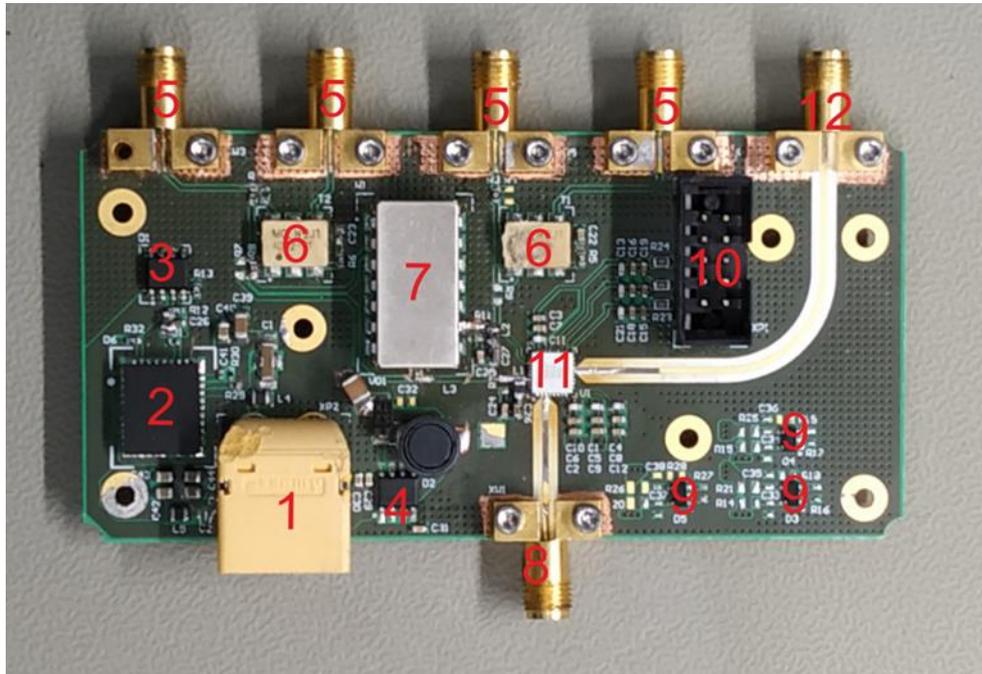


Рис. 8. Внешний вид блока без корпуса. Цифрами обозначены:
 1 – разъём питания XT-60; 2 – импульсный стабилизатор питания TPS84250; 3 – линейный стабилизаторы MIC39102; 4 – инвертер напряжения MAX764; 5 – входной SMA-разъём модулирующего сигнала; 6 – трансформатор ADT2-1T+; 7 – гибридный ответвитель JSPQ-65W+; 8 – входной SMA-разъём высокочастотного опорного сигнала ; 9 – линейный стабилизатор отрицательного напряжения выходной MIC5271; 10 – разъём IDC-10M; 11 – смеситель частот RFUV1003; 12 – выходной SMA-разъём модулированного сигнала.

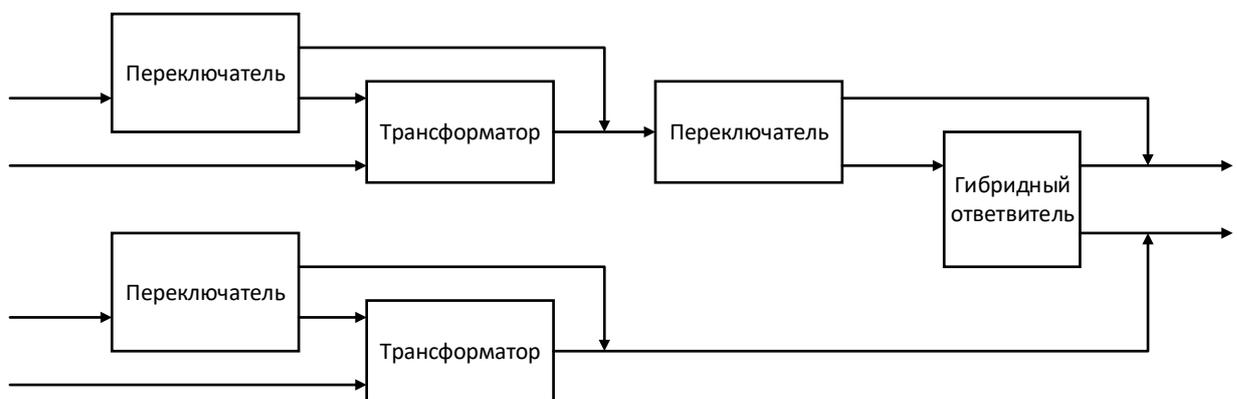


Рис. 9. Эскиз входной схемы блока модулятора.

Использование трансформаторов позволяет преобразовывать дифференциальный сигнал в униполярный. Гибридный ответвитель в равных долях разделяет приходящую на него мощность и вносит дополнительный набег фаз в девяносто градусов, тем самым формируя квадратурные составляющие сигнала. Коммутация в данной схеме осуществляется с помощью 0 Ом резисторов и позволяет как включать во входную схему те или иные элементы, так и обходить их. Таким образом существует шесть различных способов подачи информационного сигнала.

Кроме этого, смеситель RFUV1003 обладает внутренним настраиваемым усиливающим каскадом с коэффициентом передачи до 24 дБ. Для подачи управляющих напряжений во время настройки и отладки блока используется разъём IDC-10M. Но после её завершения цепь питания будет перекоммутирована на линейные стабилизаторы MIC5271, которыми будет фиксироваться обнаруженный во время отладки оптимальный набор управляющих напряжений.

Дальность и эффективность РЛК зависит не только от свойств системы и энергетических характеристик сигнала, но и от свойств формы и спектра радиосигнала. В частности, выдвигаются требования к величине динамического диапазона, свободного от гармонических и негармонических составляющих сигнала, подверженного нелинейным искажениям. Для данного РЛК требуется динамический диапазон не менее 50 дБ.

В ходе настройки блока был определен набор управляющих напряжений, который обеспечивает максимальное, среди прочих, значение динамического диапазона сигнала 40 дБ. После этого, используя подстройку постоянным смещением на квадратурных входах микросхемы, удалось достичь значения динамического диапазона в 51 дБ.

Заключение

Сотрудниками Института МПСУ НИУ «МИЭТ» ведется разработка гибридного радиолокационного комплекса обнаружения малых целей на базе ЦАР. В рамках разработки предложена архитектура комплекса, проведен

системный расчет, определены требования к отдельным узлам РЛК. В ходе прототипирования РЛК были разработаны блоки формирования опорных сигналов, блоки деления сигнала гетеродина, блок модулятора, которые по своим характеристикам отвечают требованиям комплекса. В рамках разработки РЛК сотрудниками Института МПСУ в настоящий момент также ведутся работы по проектированию и включению приемных модулей ЦАР, передающих модулей АФАР, в дальнейшем планируется сопряжение модулей в рамках приемной ЦАР, сопряжение ЦАР и АФАР с другими блоками комплекса, а также полигонные испытания.

Литература

1. Liberti J.C., Rappaport T.S. *Smart antennas for wireless communications*. USA, NJ: Prentice Hall PTR, 1999. ISBN 13: 9780137192878
2. Kuzmin I.A., Prihodko D.V., Efremov I.V., Chistukhin V.V., Maksimovskaya A.I. Ring Concentric Modular Antenna Array. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow, 2019. P. 2018-2019.
3. Пат. 2680665 Российская Федерация, СПК Н01Q 21/06. Кольцевая концентрическая модульная антенная решетка / Лялин К.С., Мелёшин Ю.М., Кузьмин И.А.; заявитель и патентообладатель НИУ МИЭТ. – № 2018120479; заявл. 04.06.18; опубл. 25.02.19, Бюл. № 6.
4. Lyalin K. S., Prihodko D. V., Kurganov V. V. Approach to use pseudo-noise sequences in inner calibration system of active phased antenna arrays. *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, St. Petersburg, 2016. P.425–427. DOI: [10.1109/EIConRusNW.2016.7448212](https://doi.org/10.1109/EIConRusNW.2016.7448212)
5. Lyalin K.S., Prihodko D.V., Kurganov V.V., Khasanov M.S., Chistukhin V.V. Approach to use pseudo-noise calibration method for wideband calibration of antenna arrays. *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in*

Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), St. Petersburg, 2017. P. 1257–1260. DOI: [10.1109/EIconRus.2017.7910793](https://doi.org/10.1109/EIconRus.2017.7910793)

6. Waweru N. P., Konditi D. B. O., Langat P. K. Performance analysis of MUSIC, Root-MUSIC and ESPRIT DOA Estimation Algorithm. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2014. Vol.8. No.1. P.209–216.

Для цитирования:

Погорельский И.В., Луканов А.В., Цветков В.К., Лялин К.С. Проблемы разработки элементов радиолокационного комплекса обнаружения малозаметных целей на базе цифровой антенной решетки. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/4/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.4